

# 層状超伝導体へのスピン注入

東京大学 物性研究所

新見 康洋

## 要旨

本研究では、7.2 K 以下で超伝導性を示す層状化合物、二セレン化ニオブ NbSe<sub>2</sub> を薄膜化して、スピン吸収型スピンバルブ素子を作製し、超伝導転移温度  $T_c$  以下でのスピン緩和機構を明らかにすること、さらに理論的に予測されている巨大スピンホール効果の観測を目指して実験を行った。NbSe<sub>2</sub> を用いたスピンバルブ素子を作製する前に、NbSe<sub>2</sub> と同程度の  $T_c$  を有する単体遷移金属のニオブ Nb を用いてスピン吸収の実験を行い、スピンの緩和するまでの時間（スピン緩和時間  $\tau_{sf}$ ）を算出した。フォノンが消失する 10 K 以下では、通常非磁性体金属の  $\tau_{sf}$  は温度に依存しないことが知られているが、Nb が超伝導になると  $\tau_{sf}$  が 4 倍以上増大することが分かった。さらに同様の測定を層状超伝導体である NbSe<sub>2</sub> で行うために、スピンバルブ素子の作製を試みた。

## 1. 研究目的と成果

グラフェンに代表されるように、近年の微細加工技術の発展に伴って、層状物質を薄膜化することでこれまでに顕わにならなかった物性の観測、また物性の電界制御が可能となってきている。例えば、潤滑剤として古くから利用されている二硫化モリブデン MoS<sub>2</sub> の結晶をグラフェンと同様に剥離し、そこに電気二重層と呼ばれるイオン液体を介してバイアス電圧を印加することで、MoS<sub>2</sub> 内のキャリア濃度を増加させることができる。その結果、あるキャリア濃度の領域で MoS<sub>2</sub> が超伝導転移し、さらにその転移温度をキャリア濃度で変調できることが報告されている[1]。

また電子の電荷とスピン角運動量の 2 つの自由度を取り入れたスピントロニクス分野でも層状物質の研究は進展しつつある。特にグラフェンは軽元素でスピン軌道相互作用 (SOI) が弱いため、スピンの情報を損失なく、より遠くまで伝搬できる物質として注目されている[2]。逆に SOI の強い層状物質を用いれば、白金などと同様に、スピン角運動量のみの流れであるスピン流を効率良く電流に変換することも期待されるが、現在までのところそのような報告はない。そこで本研究では、SOI の強い層状超伝導体にスピン流を注入し、超伝導体中におけるスピン緩和機構を明らかにすること、さらには理論的に予測[3]されている巨大スピンホール効果の観測を目指して実験を行った。

まず層状超伝導体へのスピン注入を行う前に、比較的 SOI が強く、 $T_c$  も高いニオブ Nb を用いて実験を行った。図 1(a)の挿入図に、本研究で使用した素子の概念図を示す。Nb は 2 本の強磁性体パーマロイ Py 細線の間配置されており、それを SOI の弱い銅 Cu で架橋する。左側の Py から Cu に電流  $I$  を流すことで、電流の流れていない Cu 細線右側には、スピン流のみが流れている。このスピン流は SOI の強い Nb に積極的に吸収されるため、右側の Py で検出される非局所電圧  $V$  は、Nb 細線がない場合に比べて減少する。図 1(a)に、 $T_c (= 5.5 \text{ K})$  以上と以下で測定したスピン蓄積信号 ( $\Delta R_s \equiv VI$ ) の電流依存性を示す。 $T_c$  よりも高い 10 K では、スピン蓄積信号は電流に依存しないが、 $T_c$  よりも十分低い

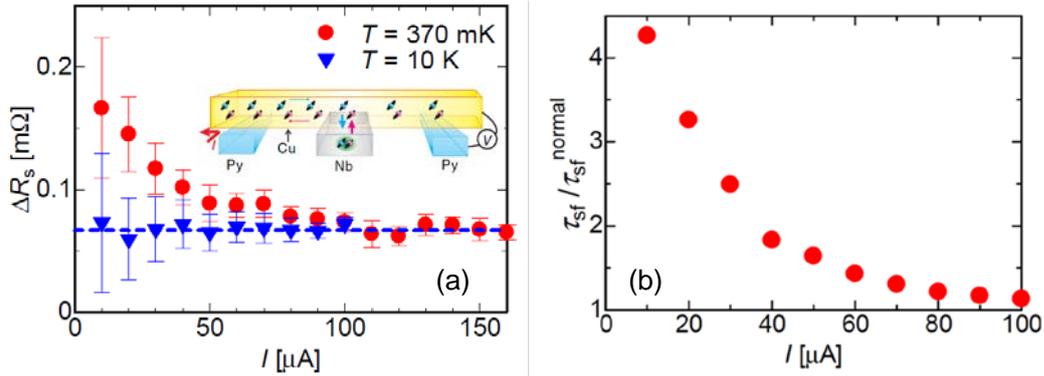


図 1: (a)  $T = 370 \text{ mK}$  と  $10 \text{ K}$  で測定したスピン蓄積信号  $\Delta R_s$  の電流依存性。挿入図はこの測定で使用したスピン吸収型スピンバルブ素子の概念図。(b) (a) から見積られた超伝導状態におけるスピン緩和時間  $\tau_{sf}$  の電流依存性。縦軸は  $T = 10 \text{ K}$  での  $\tau_{sf}^{\text{normal}}$  で規格化している。

$370 \text{ mK}$  では、電流の減少と共にスピン蓄積信号が増大する様子が観測された。このことは、Py に流す電流  $I$  を減らすと有効的な電子温度が減少すること、さらに超伝導体に転移すると、Nb 中でのスピン流の緩和が抑制されることを意味している。

得られたスピン蓄積信号から超伝導状態におけるスピン緩和時間  $\tau_{sf}$  を求めることができる。本測定で用いたスピンバルブ素子は、超伝導体 Nb と非磁性体 Cu がオーミック接合しているために、界面での超伝導近接効果を考慮する必要がある。ここでは *dirty limit* で適用される Usadel 方程式を使って、超伝導体中での  $\tau_{sf}$  を直接算出した。その結果、 $\tau_{sf}$  は  $T_c$  以上の値 ( $\tau_{sf}^{\text{normal}}$ ) よりも 4 倍以上も大きくなることが分かった[4]。これは、スピン 1 重項を形成する超伝導体中ではスピン伝導はクーパー対ではなく、準粒子が担っていることを示しており、さらに超伝導状態では準粒子の実効的な速度が低下するため、スピン緩和にかかる時間が長くなることを意味している。

次に、このようなスピン輸送特性を本来の目的である層状超伝導体を用いて行うことを試みた。図 2(a), (b)にはスコッチテープを用いて薄膜化したグラフェン及び  $\text{MoS}_2$  の原子間力顕微鏡像、さらに図 2(c)にはバルクの  $\text{NbSe}_2$  で測定した電気抵抗測定の予備的な結果を示す。バルクの状態では先行研究と同様に、約  $7.5 \text{ K}$  で超伝導転移することを確認した。現在  $\text{NbSe}_2$  を  $\text{MoS}_2$  と同様に薄膜化し、図 2(d)のような素子を作製中である。図 2(d)では  $\text{MoS}_2$  を用いて素子を作製したが、電子濃度が低すぎたため、 $\text{MoS}_2$  の抵抗が大きく、スピン吸収の実験を行うことはできなかった。

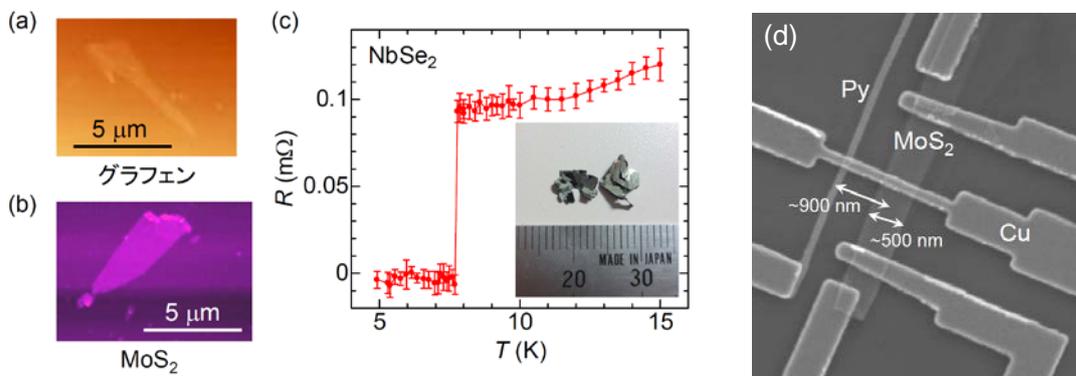


図 2: (a), (b) グラフェン及び  $\text{MoS}_2$  薄膜の原子間力顕微鏡像。(c) バルク  $\text{NbSe}_2$  の電気抵抗の温度変化。約  $7.5 \text{ K}$  で超伝導転移した。(d)  $\text{MoS}_2$  を薄膜化して作製した素子の電子顕微鏡像。

## 2. まとめと今後の課題

本研究では、層状超伝導体 NbSe<sub>2</sub> へのスピン注入を目指して、まず単体遷移金属の Nb を用いて超伝導状態へのスピン注入を行った。Nb の  $T_c$  以下では、スピン蓄積信号の増大が観測され、Usadel 方程式を用いた解析を行うことで、最低温度 370 mK ではスピン緩和時間が 4 倍以上長くなることを実験的に明らかにした。さらに層状超伝導体にスピン注入する素子の作製を行った。NbSe<sub>2</sub> は試料に限りがあるため、まずは安価に入手可能なグラファイトや MoS<sub>2</sub> を剥片化し、素子を作製する技術を確立後、電界誘起超伝導体である MoS<sub>2</sub> を用いてスピンバルブ素子を作製した。MoS<sub>2</sub> を超伝導転移させるためには、イオン液体を介して電界を印加し電子濃度を上昇させる必要があったため、この素子では超伝導体へのスピン注入はできなかったが、現在、NbSe<sub>2</sub> を用いた素子作製に取りかかっている。

現段階では実現していないが、将来的には超伝導状態におけるスピンホール効果の観測を行いたい。上述したように、超伝導状態ではスピン伝導はクーパー対ではなく、準粒子が担う。超伝導状態では準粒子の抵抗が実効的に大きくなることに起因して、スピンホール効果は温度の低下と共に指数関数的に増大することが予測されている。このように  $T_c$  以下で増大するスピンホール効果は、将来的に有望なスピン流電流変換の候補となり得る。さらに Cu の代わりに、スピン軌道相互作用の弱い層状物質であるグラフェンをスピン輸送材料として用い、さらに NbSe<sub>2</sub> をスピン流電流変換材料として用いることで、超薄型超低消費電力のスピン流回路を作製することが可能となる。

### 【参考文献】

- [1] J. T. Ye *et al.*, Science **338**, 1193 (2012).
- [2] Y. P. Liu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **102**, 033105 (2013).
- [3] S. Takahashi and S. Maekawa, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 010110 (2012).
- [4] T. Wakamura, N. Hasegawa, K. Ohnishi, Y. Niimi, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. **112**, 036602 (2014).